

# 泉州湾红树林湿地土壤 CO<sub>2</sub> 通量周期性变化特征\*

王宗林<sup>1</sup> 吴沿友<sup>1,2,\*</sup> 邢德科<sup>1</sup> 刘荣成<sup>1</sup> 周贵尧<sup>1</sup> 赵宽<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室/江苏省重点实验室/江苏大学农业工程研究院, 江苏镇江 212013; <sup>2</sup>中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

**摘要** 福建泉州湾红树林湿地生态系统所处地属正规半日潮, 为新近栽植的人工修复林带. 采用 Li-840 便携式土壤二氧化碳分析仪测定主要红树群落土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量, 研究土壤 CO<sub>2</sub> 通量周期性变化特征. 结果表明: 泉州湾红树林处于幼林期, 其土壤 CO<sub>2</sub> 通量较小; 早、晚潮潮间期 秋茄和桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量随退潮时间变化趋势基本一致; 泉州湾红树林湿地土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量分别为 557.08 ~ 2211.50 μmol · mol<sup>-1</sup> 和 -0.21 ~ 0.40 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>. 早、晚潮潮间期和晚、早潮潮间期 CO<sub>2</sub> 通量平均值分别为 0.26 和 -0.01 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>; 对于同一退潮时刻, 早、晚潮潮间期 CO<sub>2</sub> 通量大于晚、早潮潮间期. 早、晚潮潮间期 CO<sub>2</sub> 通量与对应的即时 CO<sub>2</sub> 浓度呈“钟”型变化, CO<sub>2</sub> 通量随 CO<sub>2</sub> 浓度的增加呈先增加后降低的趋势, 近似高斯分布. 据此可建立该系统土壤 CO<sub>2</sub> 通量与 CO<sub>2</sub> 即时浓度的数学模型.

**关键词** 红树林湿地 CO<sub>2</sub> 通量 潮间期 秋茄 桐花树

文章编号 1001-9332(2014)09-2563-06 中图分类号 X16 文献标识码 A

**Periodic characteristics of soil CO<sub>2</sub> flux in mangrove wetland of Quanzhou Bay, China.** WANG Zong-lin<sup>1</sup>, WU Yan-you<sup>1,2</sup>, XING De-ke<sup>1</sup>, LIU Rong-cheng<sup>1</sup>, ZHOU Gui-yao<sup>1</sup>, ZHAO Kuan<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Ministry of Education and Jiangsu Province Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology/Institute of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2014, 25(9): 2563-2568.

**Abstract:** Mangrove wetland ecosystem in Quanzhou Bay in Fujian Province is newly restored with a regular semidiurnal tide. Soil CO<sub>2</sub> concentration in the mangrove soil was determined by Li-840 portable gas analyzer, and periodic characteristics of soil CO<sub>2</sub> emission was investigated. The soil CO<sub>2</sub> flux in the wetland soil was relatively small because the mangrove was young. The change trends of soil CO<sub>2</sub> concentration and flux with time were consistent in *Kandelia obovate* and *Aegiceras corniculatum* communities in the intertidal periods. The CO<sub>2</sub> concentration and flux in the wetland soil were 557.08-2211.50 μmol · mol<sup>-1</sup> and -0.21-0.40 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, respectively. The average CO<sub>2</sub> flux in the wetland soil was 0.26 μmol · mol<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup> in the intertidal of morning and evening tides (early intertidal) and -0.01 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> in the intertidal of evening and morning tides (late intertidal), respectively. At the same time after the tide, the concentration and flux of CO<sub>2</sub> in the mangrove soil in early intertidal was higher than that in late intertidal. In early intertidal, the relationship between the flux and instantaneous concentration of CO<sub>2</sub> in the wetland soil was expressed as a bell-shaped curve, and CO<sub>2</sub> flux increased first and then decreased with the increasing CO<sub>2</sub> concentration, which was in conformity with Gaussian distribution.

**Key words:** mangrove wetland; CO<sub>2</sub> flux; intertidal; *Aegiceras corniculatum*; *Kandelia obovate*.

二氧化碳(CO<sub>2</sub>)是最主要的温室气体,对全球气候变暖的贡献约为70%<sup>[1]</sup>.土壤作为生态系统的重要组成部分,既是一个巨大的碳库,又是大气CO<sub>2</sub>

重要的碳源<sup>[2]</sup>.土壤CO<sub>2</sub>通量表现为土壤呼吸,是土壤与大气间的气体交换量,包含吸收和释放两部分.吸收部分是指土壤自养微生物同化CO<sub>2</sub>量,释放部分是由于土壤微生物氧化有机物和根系呼吸产生,极少的部分来自土壤动物的呼吸和化学氧化<sup>[3-4]</sup>.关于土壤CO<sub>2</sub>通量的研究已逐渐成为全球变化研究的

\* “十二五”国家科技支撑计划项目(2009BADB2B04-03)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: yanyouwu@ujs.edu.cn

2013-12-16 收稿, 2014-05-26 接受.

核心<sup>[5]</sup>.湿地与森林、海洋并成为全球三大生态系统<sup>[6]</sup>,其碳通量与全球变化密切相关.天然湿地每年向大气中排放的 CO<sub>2</sub> 占全球 CO<sub>2</sub> 排放总量的 5%~8%<sup>[2]</sup>.红树林生态系统作为重要的湿地生态系统之一,与单纯意义上的森林和海洋生态系统有关联也有区别.

红树林湿地是指生长着红树植物群落的湿地,红树植物群落是生长在热带、亚热带海岸潮滩盐渍土壤的特有的木本植物群落,在海岸河口生态系统中不仅具有防浪护岸固沙作用<sup>[7]</sup>,还具有其他的生态价值和经济价值<sup>[8]</sup>.有研究认为,红树林生态系统是一个强的碳汇,而土壤 CO<sub>2</sub> 通量是碳主要输出源,是影响其汇值的关键因素<sup>[9-12]</sup>.因此,对土壤 CO<sub>2</sub> 通量周期性变化规律研究具有重要意义.

目前对沼泽、平原、滨海等其他湿地类型土壤 CO<sub>2</sub> 通量的研究较多<sup>[13-17]</sup>,对红树林 CO<sub>2</sub> 通量的研究多集中在土壤-大气界面 CO<sub>2</sub> 通量的影响因子和应用等方面<sup>[6,12,18-19]</sup>.潮涨、潮落下滩涂土壤 CO<sub>2</sub> 通量日变化特征的研究则较少.本研究对红树人工林在成林初期的土壤 CO<sub>2</sub> 通量日变化规律进行了研究,分析 CO<sub>2</sub> 通量与该段时间内即时 CO<sub>2</sub> 浓度的变化规律,为下一步建立合适的数学模型提供参考,为估算红树林生态系统碳源/汇值提供简便易行的方法,为恢复我国沿海地区红树林生态系统提供科学依据.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

泉州湾河口红树林湿地(24°48′—24°51′ N, 118°46′—118°46′ E)位于福建省东南部泉州湾,属南亚热带海洋性季风气候,年均温 19.2 °C,极端最低气温 2.1 °C,极端最高气温 37 °C,4 月均温 20.4 °C,7 月均温 27.1 °C,11 月均温 19.3 °C,全年几乎无霜;年均降水量 1120 mm,降雨主要集中在 5—6 月,年均蒸发量 2000 mm;土壤盐度为 3.9~34.1.该区是典型的浅水型河口半封闭港湾,水区受潮汐变化明显,为正规半日潮,即一日之内两次涨落,每次周期 12.4 h.洛阳江红树林湿地总面积 876.9 hm<sup>2</sup>,其中滩涂面积 568.5 hm<sup>2</sup>,水域面积 308.4 hm<sup>2</sup>.秋茄(*Kandelia obovate*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)和白骨壤(*Avicennia marina*)等树种为优势植物,但白骨壤的分布面积较小.该区土壤 pH 为 6.92~7.66,呈明显的中性偏弱碱性<sup>[20]</sup>,主要为黏土质粉砂沉积物,粉砂含量最多, >43%;黏土含量次之, >35%;砂含量为 0.56%~20%<sup>[21]</sup>.

### 1.2 试验设计

根据该区红树林分布情况,选择洛阳江中游屿头村的秋茄群落和桐花树群落作为 2 个土壤原位测定点.监测完整潮间期即早潮、晚潮后 6 h 内的 CO<sub>2</sub> 浓度值,监测 3 d,作为 3 个重复.潮间期为 6~7 h,测定潮水退后 1、2、3、4、5 和 6 h,潮水刚退的时刻为 0 h.

### 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 CO<sub>2</sub> 浓度测定** 采用 Li-840 便携式土壤二氧化碳分析系统(Li-COR, US)测定 CO<sub>2</sub> 浓度.该系统由红外 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪、空气泵、掌上电脑、蓄电池和土壤呼吸气室组装而成.土壤空气采气室由裹尼龙网的玻璃漏斗和惰性硬质塑料管(内径 2 mm)组成,硬质塑料管一端套在倒置的玻璃漏斗颈部,连接处用石蜡密封,另一端通过橡胶软管与 Li-840 探头连接,并在接口处涂抹石蜡以防漏气.

2013 年 6 月 23—27 日和 9 月 8—9 日,分别测定土壤表层的 CO<sub>2</sub> 实时浓度.在距树干 15 cm 处,将采气室压按在土壤表层 1 cm 处,连接好 Li-840 系统,确保各处不漏气后,开始测定.连续测定 10 min,数据记录频率为 10 s<sup>[22]</sup>.

**1.3.2 CO<sub>2</sub> 通量的计算** CO<sub>2</sub> 通量的计算公式为:

$$F = 10000k \cdot \frac{V}{A} \cdot \frac{1}{V_m}$$

式中:  $F$  为 CO<sub>2</sub> 排放通量(μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>);  $k$  为 CO<sub>2</sub> 浓度的变化速率(μmol · mol<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup>);  $V$  为采样气室的体积(m<sup>3</sup>);  $A$  为采样气室底面积(m<sup>2</sup>);  $V_m$  为标准状态下气体摩尔体积(22.4 L · mol<sup>-1</sup>).

### 1.4 数据处理

采用 SigmaPlot 12.3 软件进行数据统计分析,利用单因素方差分析(one-way ANOVA)方法进行方差分析和差异显著性检验(α=0.05).利用 Origin 8.5 软件作图.

## 2 结果与分析

### 2.1 早、晚潮潮间期土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量的变化

由图 1 可以看出,早、晚潮潮间期 6 h 内桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 浓度大于秋茄群落,同一时刻相差均为 300 μmol · mol<sup>-1</sup>;两者在潮间期的变化趋势基本一致,均随时间的推移逐渐增加.桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 浓度为 880~2211 μmol · mol<sup>-1</sup>,秋茄为 696~1892 μmol · mol<sup>-1</sup>.在潮间期前半段和后半段时间,秋茄和桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的增加速度均是先快后慢.

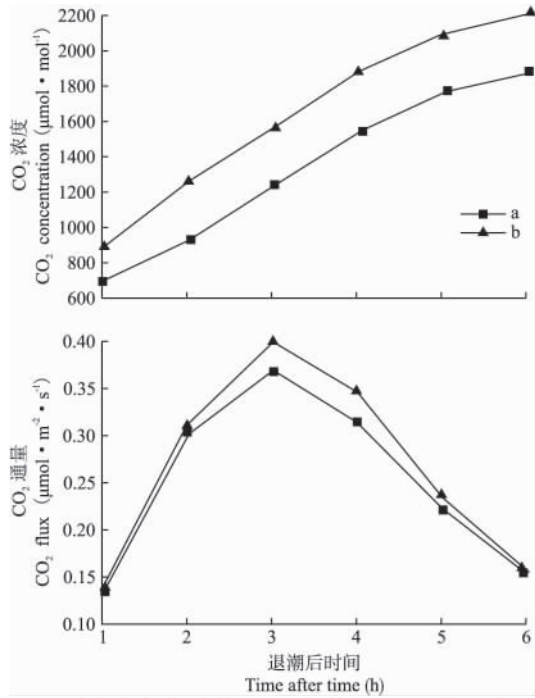


图 1 早、晚潮潮间期秋茄 (a) 和桐花树 (b) 群落土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量  
 Fig.1 Soil CO<sub>2</sub> concentration and flux of *Kandelia obovate* (a) and *Aegiceras corniculatum* (b) communities in early intertidal.

桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 通量大于秋茄群落, 在 3 和 6 h 秋茄群落分别出现最大差值 0.03 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 和最小差值 0.005 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>. 但两者随时间的推移变化趋势一致, 均先增加后降低. 早、晚潮潮间期桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 通量为 0.14~0.40 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, 平均为 0.26 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>; 秋茄群落土壤 CO<sub>2</sub> 通量为 0.13~0.37 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, 平均为 0.25 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>.

2.2 桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量的周期性变化

因秋茄和桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 的变化较一致, 故以桐花树群落为例分析土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量的周期性变化. 由图 2 可以看出, 桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 浓度为 557.08~2211.50 μmol · mol<sup>-1</sup>. 早、晚潮潮间期 CO<sub>2</sub> 浓度逐渐上升, 上升幅度逐渐减小; 晚、早潮潮间期土壤 CO<sub>2</sub> 浓度总体呈上升趋势, 1~4 h 上升, 随后下降又再上升. 对于同一潮退时刻, 早、晚潮潮间期的 CO<sub>2</sub> 浓度明显高于晚、早潮潮间期.

桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 通量在早、晚和晚、早 2 个潮间期的变化趋势不同. 在晚、早潮潮间期受夜间环境影响变化较复杂, 先上升后出现负值, 最后上升为正值. 整个周期的 CO<sub>2</sub> 通量为 -0.21 ~ 0.40 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, 平均为 -0.01 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, 最

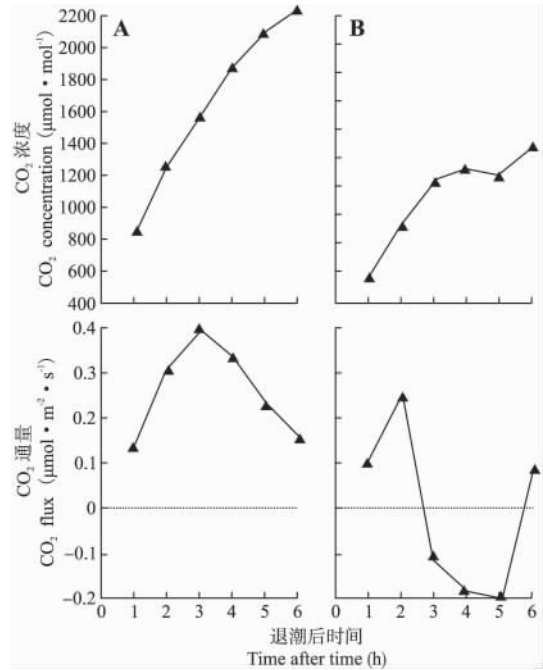


图 2 桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量的周期变化  
 Fig.2 Period changes of soil CO<sub>2</sub> concentration and flux of *Aegiceras corniculatum* community.  
 A: 早、晚潮潮间期 Early intertidal; B: 晚、早潮潮间期 Late intertidal.

大值在早、晚潮潮间期 3 h 时, 最小值在晚、早潮潮间期 5 h 左右. 在相同的潮退时间, 早、晚潮潮间期的 CO<sub>2</sub> 通量明显高于晚、早潮潮间期.

2.3 土壤 CO<sub>2</sub> 通量和浓度的回归分析

由图 3 可以看出, 桐花树和秋茄群落土壤 CO<sub>2</sub>

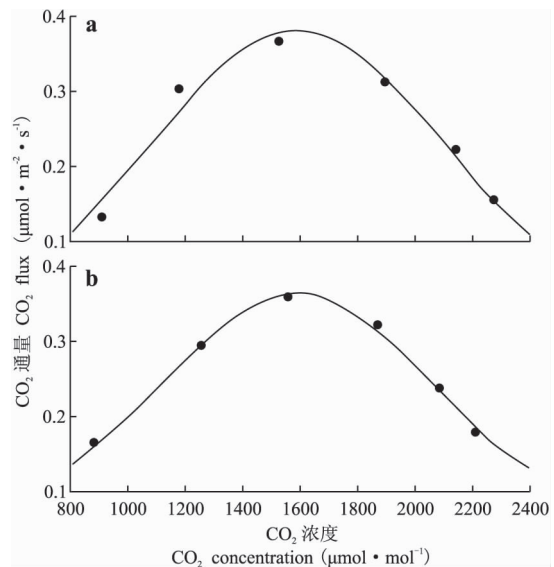


图 3 秋茄 (a) 和桐花树 (b) 群落土壤 CO<sub>2</sub> 通量与即时浓度的关系  
 Fig.3 Relation between CO<sub>2</sub> flux and instantaneous CO<sub>2</sub> concentration in the soil in *Kandelia obovate* (a) and *Aegiceras corniculatum* (b) communities.

表 1 桐花树和秋茄群落土壤 CO<sub>2</sub> 通量与即时 CO<sub>2</sub> 浓度的回归参数

Table 1 Regression parameters of the flux of CO<sub>2</sub> in the soil under *Kandelia obovate* and *Aegiceras corniculatum* with the instantaneous CO<sub>2</sub> concentration

群落类型 Community type	$x_0$	$a$	$b$	$R^2$
桐花树 <i>K. obovate</i>	1584.4025	0.3988	473.0275	0.9963**
秋茄 <i>A. corniculatum</i>	1293.9655	0.3813	443.4602	0.9674*

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ .

通量随土壤即时释放 CO<sub>2</sub> 浓度的变化趋势基本相同,均为先增加后降低,呈“钟”型;而桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 通量在更高的浓度值时才达到最大值。按三参数高斯回归方程  $y = ae^{-0.5(\frac{x-x_0}{b})^2}$  进行回归分析,相关参数见表 1。桐花树和秋茄群落均呈显著相关。

### 3 讨 论

#### 3.1 国内外典型地区红树土壤 CO<sub>2</sub> 通量

本研究中红树林土壤 CO<sub>2</sub> 通量与 Lovelock 等<sup>[23-25]</sup> 研究结果一致(表 2),但是分布在其范围的低位区间内。这是由于本研究区域为新近人工红树林恢复区,所栽植秋茄和桐花树树龄均在 5 a 以内,由于中龄林土壤中可溶性有机碳(DOC)和微生物生物量碳(MBC)均小于成熟林<sup>[26]</sup>,所以幼龄林土壤中 DOC 和 MBC 较低。另外,泉州湾的正规半日潮导致林下不易留储枯枝落叶,且淤积速度一般,所以该滩涂的腐殖质层较薄甚至缺失。因此,滩涂土壤有机物氧化释放的 CO<sub>2</sub> 量较天然成熟红树林低,土壤正通量(释放大于吸收时)也低。

#### 3.2 早、晚潮潮间期桐花树和秋茄群落土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量变化规律

早、晚潮潮间期,秋茄和桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量随退潮时间变化趋势基本一致,表明土壤

温度、含水量和土壤微生物等对该区域土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的影响方式相同<sup>[27]</sup>。李兆富等<sup>[4]</sup> 认为,多数情况下,土壤温度和水分通过影响土壤微生物代谢和植物根系生长对 CO<sub>2</sub> 排放产生作用。但在此过程中哪一个因素的影响更大,主要取决于湿地的环境限制因子。秋茄和桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量在同一时段变化趋势相同,其影响因子的作用机制一致,而且桐花树是该区域适生性最好的植物<sup>[28]</sup>,因此,可以用桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量的周期性变化来表征泉州湾红树林湿地土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量的周期性变化。

在潮间期内,桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量大于秋茄群落,这与它们自身特征有关。桐花树属矮灌丛型,栽植密度较大,落叶较多,且不易随潮水外散,因此能就地分解,导致土壤有机质含量大,微生物分解速率快。这不仅使桐花树群落土壤释放的 CO<sub>2</sub> 浓度增大,而且释放的速率也快,导致通量值较大。另外,桐花树根系须根较多,根表面积较大,可能导致根碳分泌速率增快和异养呼吸水平的提高<sup>[23-24, 28]</sup>。

#### 3.3 泉州湾红树林湿地土壤 CO<sub>2</sub> 通量周期性变化

泉州湾红树林湿地土壤 CO<sub>2</sub> 通量随潮汐周期性变化而变化,12.4 h 为一个周期,分早潮和晚潮。早、晚潮潮间期的 CO<sub>2</sub> 通量大于晚、早潮潮间期。这不仅与温度、光照的变化有关,也说明潮涨潮落过程会影响滩涂的 CO<sub>2</sub> 通量变化。这主要是通过影响含水量和土壤盐度等<sup>[29]</sup> 理化性质来实现的。早、晚潮潮间期,CO<sub>2</sub> 通量随时间推移先迅速上升后缓慢降低,在 3 h 左右达到最高值,其原因可能是在潮水退后的 2~3 h,土壤含水量迅速下降,温度逐渐上升,使土壤微生物活性增强并达到最适宜活动状态,氧化有机物速率加快,因此排放 CO<sub>2</sub> 速率变快。之后,

表 2 各地区红树林湿地土壤 CO<sub>2</sub> 通量

Table 2 Soil CO<sub>2</sub> flux in different mangrove regions

研究地点 Study site	CO <sub>2</sub> 通量 CO <sub>2</sub> flux ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	研究方法 Study method	主要红树 Main mangrove	文献 Reference
中国香港米埔和尖鼻咀	0.07~8.69	静态气室法	秋茄(倒卵形)	[18]
法属新喀里多尼亚 LaFoa River	-0.19~3.43	动态气室法(Li-820)	红树、红海榄	[12]
美国佛罗里达州滨海湿地生态 研究站	0.5~4.0	动态气室法(Li-7500)	<i>Rhizophora mangle</i> (红树属)、 <i>Avicennia germinans</i> 、榄李	[19]
澳大利亚、新西兰、加勒比等 11 处	-0.25~2.97	动态气室法(Li-6400)	红树、白骨壤	[24]
中国福建九龙江口	0.56~3.41	动态气室法(Li-8100)	秋茄	[26]
中国广西英罗港	0.58~5.203	动态气室法(WEST-1011)	秋茄、桐花树、木榄、红海榄	[6]
中国福建泉州湾河口湿地	-0.21~0.40	动态气室法(Li-840)	秋茄、桐花树	本研究 This study

随着阳光照射强度加大,温度升高,地下潜水位下降,滩涂土壤明显变干,含水量迅速下降.这对微生物活性造成影响<sup>[30]</sup>,进而影响 CO<sub>2</sub> 排放.

晚、早潮潮间期,该区域既有 CO<sub>2</sub> 的释放也有吸收,平均值为  $-0.01 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,总体平衡.夜间土壤温度、含水量等变化明显.另外,本研究区林小且疏,海风的影响会使该变化更加剧烈,进而造成各时间段 CO<sub>2</sub> 通量值的波动.晚潮退后,土壤含水量下降较快,而此时温度下降较慢,可能导致微生物有一段活跃期,以致 CO<sub>2</sub> 通量上升;随后,温度下降较快使微生物活性明显降低,加之夜间植被呼出的 CO<sub>2</sub> 缺乏光和作用的吸收,可能会使土表的 CO<sub>2</sub> 分压高于随含水量降低通透性越来越强的土壤,最终使空气中 CO<sub>2</sub> 进入土壤,出现通量的负值并连续降低;下一个潮水来前,土壤潜水位上升,通透性急剧变差,尽管此时微生物活性较弱,但根呼吸的贡献开始凸显<sup>[31]</sup>,使通量值略变正.

### 3.4 泉州湾红树林湿地土壤 CO<sub>2</sub> 通量和即时浓度的关系

通常认为,土壤 CO<sub>2</sub> 通量受到群落土壤条件(如土壤温度、pH、含氧量、微生物状况、土壤利用现状等)、水文状况、植被类型以及外部气象条件<sup>[5]</sup>的综合影响,很难用得到的既定方程模型进行预测、估算.如果两个研究区条件相似,可以用已得方程模型进行精确估算.建立即时浓度与通量的模型,通过测定瞬时 CO<sub>2</sub> 浓度,就可以预测近似环境下的土壤 CO<sub>2</sub> 通量变化.

由于土壤 CO<sub>2</sub> 通量变化具有周期性,且晚、早潮潮间期平均通量接近 0,因此本文研究了早、晚潮潮间期泉州湾红树林湿地土壤即时 CO<sub>2</sub> 浓度与该时间段 CO<sub>2</sub> 通量间的变化规律,发现两者均接近高斯分布,即随土壤即时 CO<sub>2</sub> 浓度增加,CO<sub>2</sub> 通量先增加后降低,对其进行  $y = ae^{[-0.5(\frac{x-x_0}{b})^2]}$  回归分析,对两组参数进行比较,发现两者相差较小,说明可以用相关性显著的桐花树群落模型代表本区域进行预测估算.

## 4 结 论

泉州湾红树林处于幼林期,其土壤 CO<sub>2</sub> 通量较小.早、晚潮潮间期,秋茄和桐花树群落土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量随退潮时间的变化规律一致,但在同一时刻,桐花树群落大于秋茄群落.泉州湾红树林湿地土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量的周期性变化分别为  $557.08 \sim 2211.50 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  和  $-0.21 \sim 0.40 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot$

$\text{s}^{-1}$ .早、晚潮潮间期土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量值基本大于晚、早潮潮间期,后者受夜间环境影响较大,说明潮涨、潮落过程会影响滩涂的 CO<sub>2</sub> 通量变化.基于泉州湾红树林湿地土壤 CO<sub>2</sub> 浓度和通量的周期性变化特征,发现早、晚潮潮间期一定时段内 CO<sub>2</sub> 通量与对应即时 CO<sub>2</sub> 浓度呈“钟”型,即随 CO<sub>2</sub> 浓度增加其通量先增加后降低,接近规则高斯分布,可以据此建立该系统下土壤 CO<sub>2</sub> 通量与即时 CO<sub>2</sub> 浓度的数学模型.关于该区域土壤环境因子对 CO<sub>2</sub> 通量的影响,需在潮汐周期内土壤理化性质、微生物活性(如微生物生物量碳、氧化还原酶活性等)等微观尺度上进行研究.

## 参考文献

- [1] Liu Z-X (刘泽雄), Zhu R-Q (朱瑞琴), Yao S (姚顺), et al. Winter fluxes of methane and carbon dioxide from *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* in the estuary wetland of Min River and their influencing factors. *Wetland Science & Management* (湿地科学与管理), 2010, 6(3): 46-49 (in Chinese)
- [2] Houghton JT, Meira Filho LG, Callander BA. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1998
- [3] Liu S-H (刘绍辉), Fang J-Y (方精云). Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1997, 17(5): 469-476 (in Chinese)
- [4] Li Z-F (李兆富), Lü X-G (吕宪国), Yang Q (杨青). A review on wetland soil CO<sub>2</sub> flux. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2002, 21(6): 47-50 (in Chinese)
- [5] Ma A-N (马安娜), Lu J-J (陆健健). The progress of research on carbon flux in wetland ecosystems. *Wetland Science* (湿地科学), 2008, 6(2): 116-123 (in Chinese)
- [6] Tian D (田丹). Study on the Soil CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> Fluxes of Mangrove Communities in Yingluo Bay, Guangxi. Master Thesis. Guilin: Guangxi Normal University, 2012 (in Chinese)
- [7] He B (何斌), Wen Y-G (温远光), Liu S-R (刘世荣), et al. Composition and properties of soil humus of different mangrove communities in Yingluo Bay of Guangxi. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2006, 43(3): 517-521 (in Chinese)
- [8] Zhang Y-L (张银龙), Lin P (林鹏). Studies on properties of soils under *Kandelia candel* and *Avicennia marina* mangrove forest in Jiulongjiang River estuary. *Acta Agriculturae Universitatis Henanensis* (河南农业大学学报), 1998, 32(4): 325-330 (in Chinese)
- [9] Kang W-X (康文星), Zhao Z-H (赵仲辉), Tian D-L (田大伦). CO<sub>2</sub> exchanges between mangrove and shoal wetland ecosystems and atmosphere in Guangzhou. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报),

- 2008, **19**(12): 2605–2610 (in Chinese)
- [10] Xu D-L (许冬兰). New path of developing the ocean low-carbon economy based on the blue carbon sink. *Chinese Fisheries Economics* (中国渔业经济), 2011, **29**(6): 44–49 (in Chinese)
- [11] Okimoto Y, Nose A, Oshima K, et al. A case study for an estimation of carbon fixation capacity in the mangrove plantation of *Rhizophora apiculata* trees in Trat, Thailand. *Forest Ecology and Management*, 2013, **310**: 1016–1026
- [12] Leopold A, Marchand C, Deborde J, et al. Influence of mangrove zonation on CO<sub>2</sub> fluxes at the sediment-air interface (New Caledonia). *Geoderma*, 2013, **202**: 62–70
- [13] Wang D-X (王德宣), Song C-Q (宋长春), Wang Y-Y (王毅勇), et al. CO<sub>2</sub> fluxes in mire and grassland on Ruorgai plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(2): 285–289 (in Chinese)
- [14] Morris JT, Sundareshwar PV. Responses of coastal wetlands to rising sea level. *Ecology*, 2002, **83**: 2869–2877
- [15] Hao Q-J (郝庆菊), Wang Y-S (王跃思), Song C-C (宋长春), et al. Primary study on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from wetland soils in the Sanjiang Plain. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2004, **23**(5): 846–851 (in Chinese)
- [16] Li Z-F (李兆富), Lü X-G (吕宪国), Yang Q (杨青), et al. Soil surface CO<sub>2</sub> fluxes of *Deyeuxia angustifolia* wetland in Sanjiang Plain. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Science) (南京林业大学学报·自然科学版), 2003, **27**(3): 51–54 (in Chinese)
- [17] Yang H-X (杨红霞), Wang D-Q (王东启), Chen Z-L (陈振楼), et al. Elementary research on greenhouse gas emissions in Chongming east intertidal flat of the Changjiang Estuary. *Marine Environmental Science* (海洋环境科学), 2006, **25**(4): 20–23 (in Chinese)
- [18] Chen GC, Tam NFY, Ye Y. Spatial and seasonal variations of atmospheric N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> fluxes from a subtropical mangrove swamp and their relationships with soil characteristics. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, **48**: 175–181
- [19] Barr JG, Engel V, Smith TJ. Hurricane disturbance and recovery of energy balance, CO<sub>2</sub> fluxes and canopy structure in a mangrove forest of the Florida Everglades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, **153**: 54–66
- [20] Liu R-C (刘荣成). Study and Application of the Plants' Adaptability to Environment of Quanzhou Bay Estuary Wetland. PhD Thesis. Zhejiang: Jiangsu University, 2011 (in Chinese)
- [21] Huang Z-G (黄宗国). Biodiversity on Marine Estuarine Wetland. Beijing: China Ocean Press, 2004 (in Chinese)
- [22] Zhu Y-L (朱咏莉), Wu Y-Y (吴沿友), Li P-P (李萍萍), et al. A method for determination soil profile standard CO<sub>2</sub> efflux. China, 201010240657.7. 2010-07-29 (in Chinese)
- [23] Lovelock CE, Feller IC, Ellis J. Mangrove growth in New Zealand estuaries: The role of nutrient enrichment at sites with contrasting rates of sedimentation. *Oecologia*, 2007, **153**: 633–641
- [24] Lovelock CE. Soil respiration and belowground carbon allocation in mangrove forests. *Ecosystems*, 2008, **11**: 342–354
- [25] Lovelock CE, Ruess RW, Feller IC. CO<sub>2</sub> efflux from cleared mangrove peat. *PLoS One*, 2011, **6**(6): e21279. doi: 10.1371/journal.pone.0021279
- [26] Jin L (金亮). Carbon Sequestration and Balance in *Kandelia candel* Plantation Ecosystem in Jiulongjiang Estuary. PhD Thesis. Xiamen: Xiamen University, 2012 (in Chinese)
- [27] Wu Y-Y (吴沿友), Zhang Y (张颖), Zhu Y-L (朱咏莉), et al. Quantitative change of nitrifying bacteria at Quanzhou bay estuary wetland. *Earth and Environment* (地球与环境), 2012, **40**(4): 473–478 (in Chinese)
- [28] Wu Y-Y (吴沿友), Liu R-C (刘荣成). The Plants' Adaptability to Environment of Quanzhou Bay Estuary Wetland. Beijing: Science Press, 2011 (in Chinese)
- [29] Zeng C-S (曾从盛), Lei B (雷波), Wang W-Q (王维奇), et al. Methane emission from *Scirpus triquetus* wetland in the Min River estuary. *Wetland Science* (湿地科学), 2009, **7**(2): 142–147 (in Chinese)
- [30] Alm J, Schulman L, Walden J, et al. Carbon balance of a boreal bog during a year with an exceptionally dry summer. *Ecology*, 1999, **80**: 161–174
- [31] Jin Z (金钊), Dong Y-S (董云社), Qi Y-C (齐玉春). On disputation about partitioning respiration of aetual root and rhizomicrobes. *Soils* (土壤), 2008, **40**(4): 517–522 (in Chinese)

作者简介 王宗林,男,1988年生,硕士研究生.主要从事湿地生态系统土壤碳转化研究. E-mail: guilin19881010wa@163.com

责任编辑 孙菊